بررسی عددی اثر باد بر شکل شعله در مشعل بلند پالایشگاه سرخون و قشم*

سیدمحمد جوادی[۱] مرتضی عنبرسوز[۲] علی قبادی[۳] محسن کهرم[۴]

چکیده باتوجه به ارتفاع زیاد مشعل‌های بلند نیروگاه، سرعت جریان باد نقش مهمی بر شکل شعله و توزیع دمای ناشی از آن در بدنهٔ مشعل دارد؛ لذا در این مقاله بااستفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی احتراق آشفته در نوک مشعل، موقعیت شعله و دمای بدنهٔ مشعل در سرعت‌های مختلف جریان باد محاسبه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد در سرعت‌های بیشتر از ۵ متر بر ثانیه، شعله روی بدنهٔ مشعل می‌خوابد که سبب بالا رفتن دمای بدنه می‌گردد. جابه‌جا شدن موقعیت دمای بیشینهٔ بدنه با تغییر سرعت باد، می‌تواند سبب ایجاد خستگی و گسیختگی طولی در بدنهٔ مشعل گردد.

واژه‌های کلیدی شبیه‌سازی عددی; فلر; اثر باد; شکل شعله.

Numerical Investigation of Wind Effects on the Flame Shape of Sarkhoon and Qeshm's Refinery Flares

S.M. Javadi M. Anbarsooz A. Ghobadi M. Kahrom

Abstract *Due to considerable height of the flaring flames, wind speed has siginificant effects on its flame shape and cause consequent damages. In this paper, the effects of wind speed on the flame shape and the temperature distribution of the flare wall are investigated using three-dimensional numerical simulation of turbulent combustion. Results show that at wind speeds higher than 5m/s, the flame lies over the flare wall causing its temperature to increase. Moreover, as the wind speed changes, the position of the maximum temperature point on the flare wall also changes, causing the material to experience fatigue failure.*

Key Words Numerical simulation; Flares; Wind effects; Flame shape.

★تاریخ دریافت مقاله ۹۴/۲/۲ و تاریخ پذیرش آن ۹۴/۱۱/۲۷ می‌باشد. DOI: 10.22067/fum-mech.v28i2.46595

(۱) استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه مهندسی فناوری‌های نوین قوچان.

(۲) نویسندهٔ مسئول: استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه مهندسی فناوری‌های نوین قوچان. Anbarsouz@qiet.ac.ir

(۳) کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، پالایشگاه گاز سرخون و قشم.

(۴) استاد، عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد.

مقدمه

مشعل‌های بلند یا فلرها (Flares) در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی به‌منظور سوزاندن گازهای زائد و یا غیرقابل استفاده به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند [1]. از جمله پارامترهای مهم در مطالعهٔ این سیستم‌های احتراقی، راندمان عملکرد، میزان انتشار آلاینده‌ها و طول عمر سیستم می‌باشد. باتوجه به حجم بالای گازهای ارسالی به فلر و ارتفاع بسیار بلند آنها که گاه به بیش از ۱۰۰ متر نیز می‌رسد، نحوهٔ تأمین هوای احتراق و هم‌چنین میزان اختلاط سوخت و هوا نقش مهمی بر راندمان احتراق و میزان انتشار آلاینده‌ها دارد.

وزش باد یکی از عوامل مهم بر راندمان احتراق این مشعل‌ها است که باتوجه به اثر مثبت آن بر تأمین هوای احتراق و از طرفی اثر منفی آن بر سرد شدن شعله و هم‌چنین خوابیدگی شعله می‌بایست به‌عنوان یک عامل مهم در طراحی این مشعل‌ها درنظر گرفته شود. [4-2]. اندازه‌گیری‌های تجربیِ مشخصات این سیستم‌ها، به‌دلیل اندازه و شدت آشفتگی شعله‌های آنها بسیار دشوار است (شعله در نوک مشعل‌هایی تشکیل می‌شود که در فاصلهٔ ۱۰ تا ۱۰۰ متری از سطح زمین قرار دارند). به همین دلیل تاکنون دو راهکار مختلف برای بررسی اثر سرعت باد بر عملکرد فلرهای صنعتی توسط محققان ارائه گردیده است: الف) انجام آزمایش‌های تجربی روی مدل‌های آزمایشگاهی با مقیاس کوچک و ب) استفاده از ابزار دینامیک سیالات محاسباتی (Computational Fluid Dynamics) یا CFD است [5]. CFD بر پایهٔ حل عددی معادلات بقای جرم، مومنتوم، انرژی و گونه‌ها استوار است. گرچه پژوهش‌های بسیاری توسط این روش در مورد احتراق صنعتی انجام شده است [۶]، پژوهش‌های انجام‌شده در مورد فلرهای صنعتی بااستفاده از این روش چندان گسترده نیست. در ادامه به برخی از این پژوهش‌ها اشاره شده‌است.

باکال و همکاران [7] در سال ۲۰۰۰ قابلیت استفاده از CFD در فرآیندهای احتراق صنعتی از جمله در فلرهای صنعتی را مورد بحث و بررسی قرار دادند و نشان دادند CFD می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد در این زمینه مورد استفادهٔ محققان قرار گیرد. هوآنگ و چنگ در سال ۱۹۹۴ [8] پایداری و رفتار شعلهٔ جت احتراقی پروپان را که در جهت عمود بر جریان باد می‌باشد به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و روابطی را برای مسیر حرکت جت‌های سرد و احتراقی در یک جریان متقاطع ارائه کردند. هوآنگ و ونگ در سال ۱۹۹۹ [9]، برای نمایش بهتر الگوی جریان در این نوع جریان‌های احتراقی، از روش سرعت‌سنجی لیزری داپلری (Laser Doppler Velocimetry) بهره بردند. بورگوایگنان و همکاران در سال ۱۹۹۹ [10]، یک روش آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری راندمان احتراق شعله در جریان متقاطع ارائه کردند. آنها بااستفاده‌از این روش اثر سرعت باد و دبی گازهای احتراق را بر راندمان این نوع شعله‌ها بررسی کردند. کاستینیرا و ادگار [11] در سال ۲۰۰۶ بااستفاده‌از دینامیک سیالات محاسباتی اثر تزریق بخار آب و هوا را بر عملکرد فلرهای در مقیاس آزمایشگاهی با شعلهٔ غیرپیش‌آمیخته بررسی کرد. نتایج آنها نشان داد که استفاده از نسبت-های بالای بخار به سوخت و هوا به سوخت باعث کاهش قابل توجه راندمان احتراق فلر و تولید هیدروکربن نسوخته می‌شود. آنها برای کاهش هزینهٔ محاسباتی، شبیه‌سازی را در حالت دوبعدی تقارن محوری انجام دادند.

کاستینیرا و ادگار [5] در سال ۲۰۰۸ اثر جریان باد روی یک شعلهٔ آشفته در مقیاس آزمایشگاهی را بااستفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که وزش باد می‌تواند راندمان احتراق چنین شعله‌هایی را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. شبیه‌سازی یک سیستم فلر با ترکیب جدید که درون یک محفظهٔ بسته به‌شکل لوله قرار

گرفته است در سال ۲۰۰۹ توسط مارا و کانتینیلو [12] انجام شد. آنها بااستفاده از شبیه‌سازی تلاش کردند تا هندسهٔ فلر را برای دستیابی به راندمان بالاتر بهینه کنند. لانگمن و ناتان [13] در سال ۲۰۱۱ اثر نوسانات شدیدِ ناشی از احتراق روی نرخ اختلاط و میزان تابش مرئی یک فلر پالایشگاهی در مقیاس واقعی را گزارش کردند.

در این پژوهش یک سیستم احتراقی فلر صنعتی در ابعاد واقعی، به‌منظور ارزیابی تأثیر تغییرات سرعت جریان باد بر شکل و موقعیت شعله و توزیع دمای حاصل در جدار فلر، بااستفاده از شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است. تاکنون شبیه‌سازی عددی برای یک فلر صنعتی در ابعاد واقعی با درنظر گرفتن دیوارهٔ فلر و محاسبهٔ توزیع دمای آن انجام نشده است. انگیزهٔ اصلی این پژوهش ترک‌هایی است که در بدنهٔ مشعل این فلر صنعتی مشاهده گردیده است. برای این منظور، ابتدا برای اطمینان از صحت فرضیات انجام‌شده در شبیه‌سازی عددی، نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود برای یک فلر در مقیاس آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده که تطابق خوبی بین آنها مشاهده گردیده است. سپس شبیه‌سازی احتراق گازهای فلر صنعتی مورد نظر در مقیاس واقعی انجام شده و توزیع دمای بدنهٔ مشعل در شرایط مختلف عملکردی محاسبه گردیده است. بااستفاده از توزیع دمای به‌دست آمده در جدار فلر در شرایط مختلف عملکردی، دلیل آسیب‌های مشاهده شده در جدار فلر مشخص شده است.

معادلات حاکم

معادلات حاکم بر پدیدهٔ احتراق گازهای فلر عبارتند از: بقای جرم، مومنتوم، انرژی، تابش و گونه‌ها. باتوجه به آشفته بودن جریان از معادلات متوسط‌گیری‌شدهٔ زمانی رینولدز (Reynolds averaged equations) استفاده شده است. این معادلات در حالت پایا عبارتند از:

معادلهٔ بقای جرم

$$\nabla \cdot \left(\rho \overline{\mathrm{v}} \right) = 0 \qquad (۱)$$

که در آن ρ چگالی سیال و $\overline{\mathrm{v}}$ بردار سرعت متوسط‌گیری شدهٔ زمانی است.

معادلهٔ بقای مومنتوم

$$\nabla \cdot \left(\rho \overline{\mathrm{v}}\overline{\mathrm{v}} \right) = -\nabla \mathrm{p} + \nabla \cdot \left(\mu \left(\nabla \overline{\mathrm{v}} + \left(\nabla \overline{\mathrm{v}} \right)^{\mathrm{T}} \right) - \rho \overline{\mathrm{v}'\mathrm{v}'} \right) \qquad (۲)$$

که در آن v' نوسانات آشفتهٔ بردار سرعت، μ ویسکوزیتهٔ دینامیکی سیال و p فشار است. خطوط افقی روی متغیرها نشان‌دهندهٔ مقادیر متوسط‌گیری‌شده است. جملات تنش‌های رینولدز $\rho \overline{\mathrm{v}'\mathrm{v}'}$ بایستی مدل‌سازی شوند تا معادلات فوق بسته شوند. در این پژوهش برای مدل‌سازی این جملات از مدل تنش رینولدز (Reynolds Stress Model) [14]، استفاده شده است. انتخاب این مدل آشفتگی باتوجه به بخش اعتبارسنجی این مقاله انجام شده است. شبیه‌سازی بااستفاده از مدل‌های آشفتگی دیگر از جمله Standard k-ε، RNG k-ε، Realizable k-e و k-ω (موجود در نرم‌افزار فلوئنت) انجام شد و مشاهده گردید که مدل تنش رینولدز نسبت به سایر مدل‌ها بهتر می‌تواند شکل شعله را در شرایط عملکردی مختلف پیش‌بینی کند. به دلیل محدودیت در حجم مقاله از آوردن نتایج این بررسی اجتناب شده است.

مدل‌سازی عددی احتراق

در نرم‌افزار فلوئنت، در مدل تابع احتمال چگالی (Probability Density Function)، معادلهٔ انرژی همراه با معادلهٔ کسر جرمی گونه‌ها در فضای کسر مخلوط حل می‌شود تا براساس آن درجه حرارت و کسر جرمی گونه‌ها برحسب کسر مخلوط و واریانس کسر مخلوط جدول‌بندی شود که کسر مخلوط به‌صورت زیر تعریف می‌شود [15]:

$$f=\frac{Z_i-Z_{i,ox}}{Z_{i,fuel}-Z_{i,ox}} \qquad (۳)$$

که در آن Z_i کسر جرمی گونهٔ i ام و اندیس‌های ox و fuel به‌ترتیب مقادیر در ورودی اکسیدکننده و سوخت را نشان می‌دهد. برای درنظر گرفتن اثرات آشفتگی بر نرخ واکنش‌های شیمیایی از مدل تابع احتمال چگالی با توزیع فرضی و با فرض تعادل شیمیایی استفاده شده است [16, 17]. تابع احتمال چگالی (PDF) که با p(f) نشان داده می‌شود، توصیف‌کنندهٔ نوسانات لحظه‌ای کمیت f در جریان آشفته می‌باشد و می‌تواند به‌عنوان کسری از زمان که سیال خاصیت f را دارد، درنظر گرفته شود. شکل تابع p(f) به طبیعت اغتشاشات متغیر f در جریان آشفته وابسته است. در جریان‌های واقعی توزیع p(f) دقیقاً مشخص نمی‌باشد، به‌همین‌دلیل در روش تابع چگالی احتمال با توزیع فرضی، براساس مشاهدات تجربی یک تابع ریاضی برای p(f) درنظر گرفته می‌شود که تقریبی از شکل واقعی آن می‌باشد. اگر φ_i نشان‌دهندهٔ کسر جرمی گونهٔ i ام و یا هر خاصیت ترمودینامیکی جریان سیال باشد، با مشخص بودن توزیع p(f)، مقادیر متوسط‌گیری‌شدهٔ زمانی آن بااستفاده از رابطهٔ زیر قابل محاسبه است:

$$\overline{\varphi}_i=\int_0^1 p(f)\varphi_i(f)df \qquad (۴)$$

توزیع درنظر گرفته‌شده برای تابع p(f)، توزیع β می‌باشد که عبارتست از:

$$p(f)=\frac{f^{\alpha-1}(1-f)^{\beta-1}}{\int f^{\alpha-1}(1-f)^{\beta-1}df} \qquad (۵)$$

که مقادیر α و β به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\alpha=\overline{f}\left[\frac{\overline{f}(1-\overline{f})}{\overline{f'^2}}-1\right] \qquad (۶)$$

$$\beta=(1-\overline{f})\left[\frac{\overline{f}(1-\overline{f})}{\overline{f'^2}}-1\right] \qquad (۷)$$

در تابع شکل فوق، دو متغیر $\overline{f}$ و $\overline{f'^2}$ به‌ترتیب کسر مخلوط متوسط‌گیری‌شده بر مبنای چگالی (Density-Averaged) و واریانس کسر مخلوط هستند و از دو معادلهٔ بقای به شکل زیر محاسبه می‌شوند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\overline{f})+\nabla\cdot(\rho\vec{v}\overline{f})= \nabla\cdot(\frac{\mu_t}{\sigma_t}\nabla\overline{f})+S_m \qquad (۸)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\overline{f'^2})+\nabla\cdot(\rho\vec{v}\overline{f'^2})= \nabla\cdot(\frac{\mu_t}{\sigma_t}\nabla\overline{f'^2})+C_g\mu_t(\nabla\overline{f})^2-C_d\rho\frac{\varepsilon}{k}\overline{f'^2} \qquad (۹)$$

مقادیر f' اختلاف مقادیر لحظه‌ای و متوسط کسر مخلوط ($f'=f-\overline{f}$) است و S_m عبارت چشمه برای مسائل مختلف مانند تبخیر قطرات سوخت می‌باشد. مقادیر C_d، C_g و σ_t ثابت می‌باشند. ε نرخ اتلاف اغتشاشی و k انرژی جنبشی اغتشاشی می‌باشد. پس از اصلاح نرخ واکنش‌های شیمیایی مقادیر کسر جرمی گونه‌ها، چگالی و دما برحسب مقادیر مختلف $\overline{f}$ و $\overline{f'^2}$ در جدول‌های مشخصی (Look-Up Tables) ذخیره می‌گردند و در حین حل عددی جریان آشفتهٔ احتراقی از آنها استفاده می‌شود [15].

در پژوهش حاضر، اثرات تابش بر دمای شعله بااستفاده از مدل DO (Discrete Ordinate) در محاسبات لحاظ شده و ضریب تابش محصولات احتراق بااستفاده از مدل WSGGM محاسبه شده است [15].

اعتبارسنجی

در این مقاله، حل معادلات حاکم بااستفاده از نرم‌افزار فلوئنت و در حالت پایا انجام شده است. به‌منظور اعتبارسنجی فرضیات انجام شده در شبیه‌سازی عددی، نتایج عددی با نتایج تجربی ارائه‌شده توسط جانسون و همکاران [1] برای یک فلر که درون تونل باد قرار گرفته است، مقایسه شده‌اند. حجم داخلی تونل باد تقریباً ۳۵۰ متر مکعب است و سرعت جریان باد می‌تواند از ۰/۲ تا ۳۵ متر بر ثانیه تغییر کند. سطح مقطع بخش آزمایش تونل دارای ارتفاع ۱/۲۲ متر و عرض ۲/۴۴ متر است. فلری که در بخش آزمایش این تونل قرار گرفته است، یک لولهٔ دایروی به طول ۴۷ سانتی‌متر و با قطر اسمی ۲۵ میلی‌متر (قطر داخلی ۲۲/۱ میلی‌متر و قطر خارجی ۲۴/۷ میلی‌متر) می‌باشد. این فلر به‌صورت عمودی در تونل باد قرار گرفته است (جهت جریان هوای ورودی بر محور لوله عمود است). ترکیب شیمیایی گازهای خروجی از فلر در جدول (۱) ارائه شده است. سرعت خروج این گازها از فلر ثابت و برابر با V_j=2 m/s می‌باشد و تأثیر سرعت ورودی تونل باد در حالت‌های ارائه‌شده در جدول (۲) مورد بررسی قرار گرفته است.

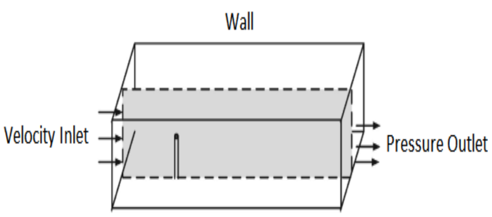
جدول ۱ ترکیب شیمیایی سوخت مورداستفاده

گونه	درصد مولی
CH_4	۹۵/۳
C_2H_6	۲/۲
CO_2	۰/۸
N_2	۱/۷

جدول ۲ شرایط مختلف آزمایش‌های انجام‌شده در تونل باد

حالت	سرعت هوا (m/s)
B	۱/۳۳
C	۲/۷۶
D	۴/۰۹
E	۵/۴۹
F	۸/۲۳
G	۱۱/۰۵

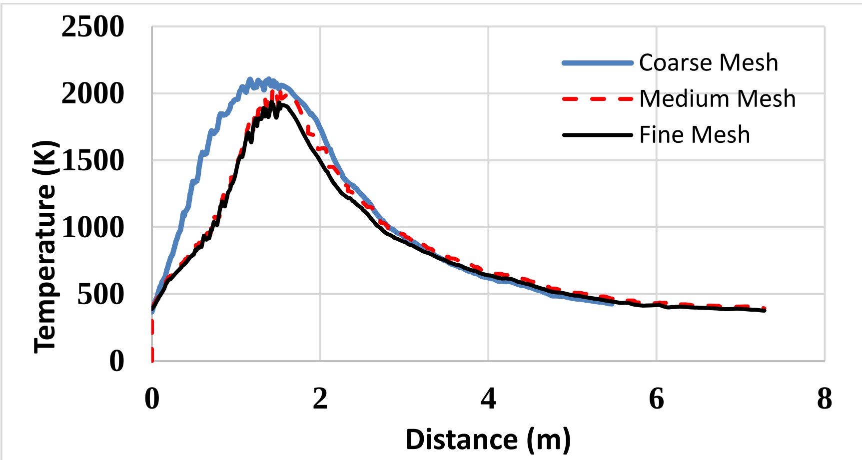
حوزهٔ محاسباتی درنظر گرفته‌شده یک مکعب مستطیل به طول ۵ متر و سطح مقطع ۲/۴۴×۱/۲۲ متر (متناظر با سطح مقطع تونل باد) می‌باشد که طرح‌وارهٔ آن در شکل (۱) نشان داده شده است. شرایط مرزی درنظر گرفته‌شده برای ورودی تونل هوا و ورودی گازهای فلر به درون محیط حل، از نوع سرعت ورودی (Velocity inlet) با سرعت ورودی مشخص، خروجی تونل باد از نوع فشار خروجی (Pressure outlet) با فشار اتمسفریک و دیواره‌های فلر و دیواره‌های تونل باد از نوع جدار (Wall) با شرط مرزی عدم لغزش و شرط حرارتی عایق می‌باشند.



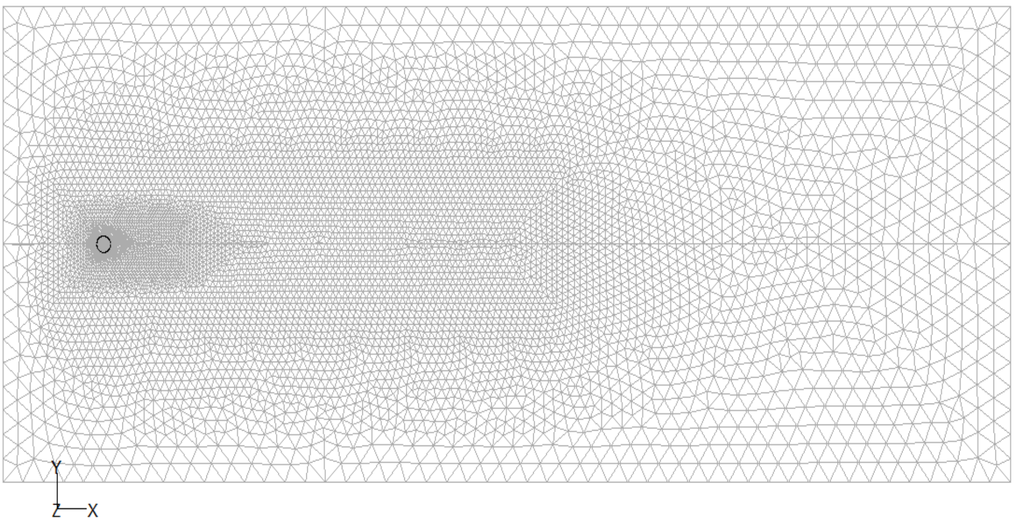
شکل ۱ حوزهٔ حل و شرایط مرزی درنظر گرفته‌شده برای شبیه‌سازی عددی

برای تولید هندسه و شبکه‌بندی محیط حل از نرم‌افزار گمبیت (Gambit) استفاده شده است. از آن‌جایی که ابعاد فلر در مقایسه با ابعاد تونل بسیار کوچک است و باتوجه به اهمیت شبکه‌بندی اطراف فلر، لازم است تا از شبکهٔ ریزتری در این ناحیه استفاده شود. به‌منظور بررسی استقلال نتایج از شبکه، توزیع

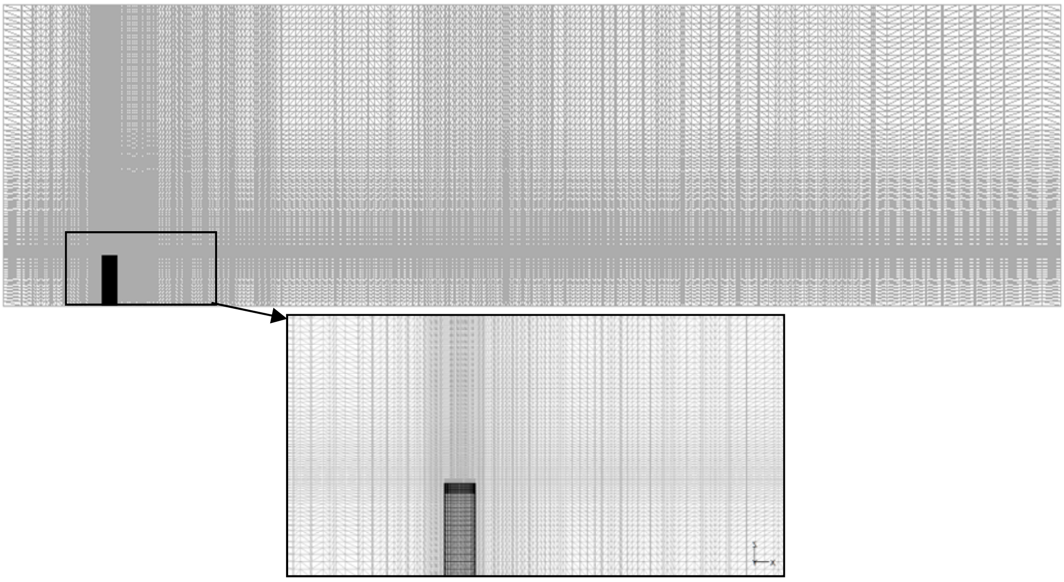
دما روی محور شعله در سرعت باد ۳۰ متر بر ثانیه برای سه شبکهٔ مختلف، شبکهٔ درشت با ۵۲۱۳۲۶ سلول محاسباتی، شبکهٔ متوسط با ۱۱۲۳۶۵۴ سلول و شبکهٔ ریز با ۱۹۹۸۷۸۱ سلول محاسباتی در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شبکهٔ متوسط را می‌توان به‌عنوان شبکهٔ بهینه از نظر دقت نتایج و هزینهٔ محاسباتی انتخاب کرد. ابعاد اعمال شده متناظر با شبکه متوسط، ۲ میلی‌متر روی محیط فلر و ۲۰ میلی‌متر روی مرزهای خارجی حوزهٔ حل می‌باشد که در دو نمای مختلف در شکل‌های (۳ و ۴) نشان داده شده است.



شکل ۲ توزیع دما روی محور شعله به‌ازای سه شبکهٔ مختلف، شبکهٔ درشت با ۵۲۱۳۲۶ سلول محاسباتی، شبکهٔ متوسط با ۱۱۲۳۶۵۴ سلول و شبکهٔ ریز با ۱۹۹۸۷۸۱ سلول محاسباتی



شکل ۳ شبکه‌بندی محیط حل از نمای بالا



شکل ۴ شبکه‌بندی محیط حل از نمای جانبی.

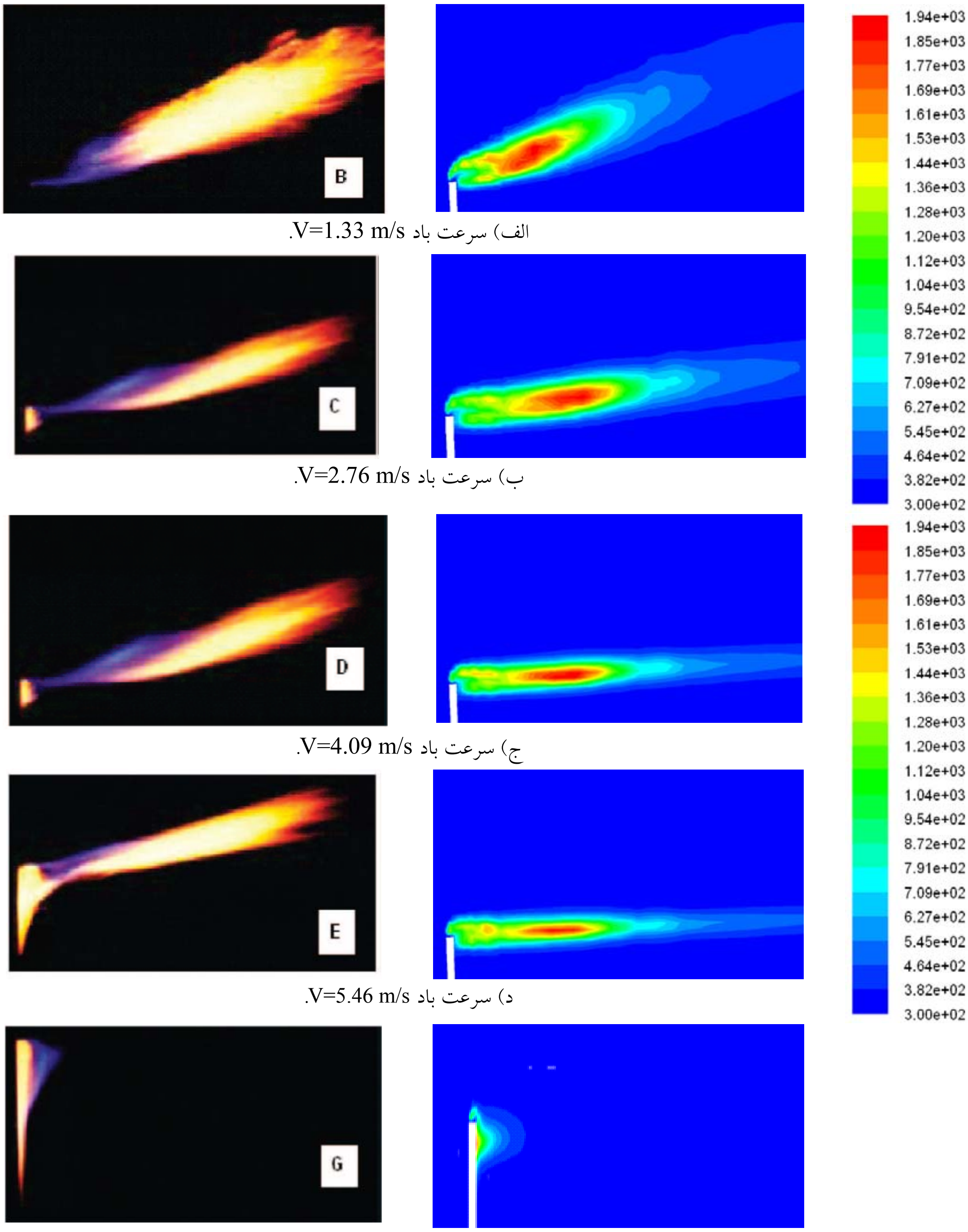
جانسون و کاستیوک [18] برای بررسی آزمایشگاهی شکل شعله از عکس‌برداری مستقیم استفاده نمودند. نتایج حاصل از این عکسبرداری‌ها در سرعت‌های مختلف جریان باد در شکل (۵) با نتایج عددی توزیع دما مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج عددی و آزمایشگاهی تطابق خوبی با هم دارند. با افزایش سرعت باد، طول شعله افزایش و حجم آن کاهش می‌یابد. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهند با افزایش سرعت باد، شعلهٔ پشت دیواره بزرگ‌تر می‌گردد. با افزایش سرعت باد، محور شعله از حالت عمودی خارج می‌شود و به‌سمت افق متمایل می‌گردد. پدیدهٔ ز خوابیدن شعله، که در سرعت‌های بالای باد رخ می‌دهد، به نسبت سرعت (و یا مومنتوم) گازهای خروجی به سرعت (و یا مومنتوم) جریان باد وابسته است.

راندمان فلر براساس میزان تبدیل هیدروکربن‌های ورودی به مقدار CO_2 خروجی ارزیابی می‌گردد. در یک فلر با عملکرد مناسب هرچه مقدار CO_2 بیشتر باشد، احتراق فلر کامل‌تر و انتشار آلاینده‌های آن کمتر می‌باشد. راندمان فلر، η_c، برابر است با نسبت دبی جرمی کربن در دی‌اکسیدکربن حاصل از احتراق به دبی جرمی کربن موجود در گازهای ورودی به فلر (رابطهٔ ۱۲) [11]:

$$\eta_c = \frac{\dot{m}_{C,\,CO_2\ \text{combustion gases}}}{\dot{m}_{C,\,\text{inlet gases}}} \qquad (۱۰)$$

در شکل (۶) راندمان فلر محاسبه‌شده از نتایج عددی با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر دو نمودار با افزایش سرعت باد، ابتدا راندمان فلر افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به بیشترین مقدار خود در سرعت حدود ۴ متر بر ثانیه، روندی نزولی دارد. روند صعودی افزایش راندمان با افزایش سرعت باد، به‌دلیل اختلاط بهتر سوخت و هوا می‌باشد. اما باتوجه به وابستگی نرخ واکنش به پارامترهای اختلاط، دما و نسبت هم‌ارزی، راندمان با افزایش بیشتر سرعت باد کاهش می‌یابد و احتراق ناقص انجام می‌شود. در سرعت های بالای باد، به‌دلیل افقی شدن شعله و خوابیدن آن روی بدنهٔ فلر، قسمتی از شعله در گردابه‌های پشتِ بدنهٔ فلر قرار می‌گیرد که دارای شدت آشفتگی بالایی می‌باشد. شدت آشفتگی اثرات قابل ملاحظه‌ای بر نرخ واکنش‌های شیمیایی دارد که پیش‌بینی دقیق آن کار

دشواری است. باتوجه به این‌که در مقالهٔ حاضر از مدل احتراق PDF بـا توزیـع β اسـتفاده شـده، دقـت آن در سرعت‌های بالا کمتر است. با این وجود همان‌طور کـه در شکل (۶) مشاهده مـی‌شـود، نتـایج آزمایشـگاهی و عـددی در مـورد رانـدمان فلـر تطـابق خـوبی نشـان می‌دهند، به‌طوری‌که حداکثر خطا در بیشـترین سـرعت باد کمتر از ۴ درصد مـی‌باشـد کـه نشـان‌دهنـدهٔ نتـایج مناسب شبیه‌سازی عددی می‌باشد.



الف) سرعت باد V=1.33 m/s.

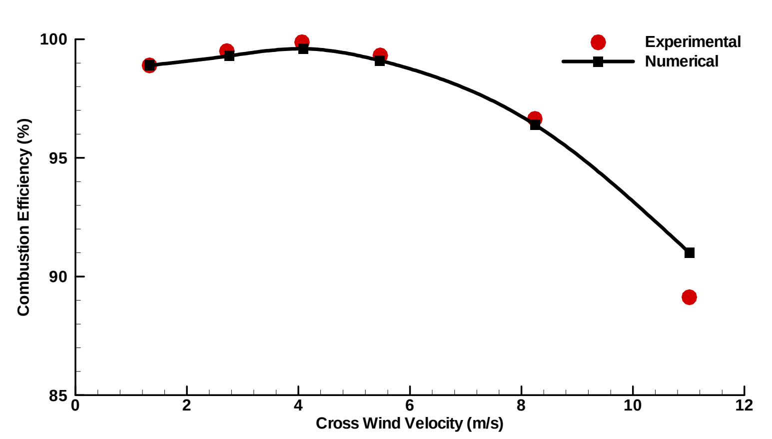
ب) سرعت باد V=2.76 m/s.

ج) سرعت باد V=4.09 m/s.

د) سرعت باد V=5.46 m/s.

ه) سرعت باد V=11.05 m/s.

شکل ۵ مقایسهٔ توزیع دمای به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی با نتایج عکس‌برداری آزمایشگاهی [15] با مقیاس یکسان در سرعت‌های باد مختلف



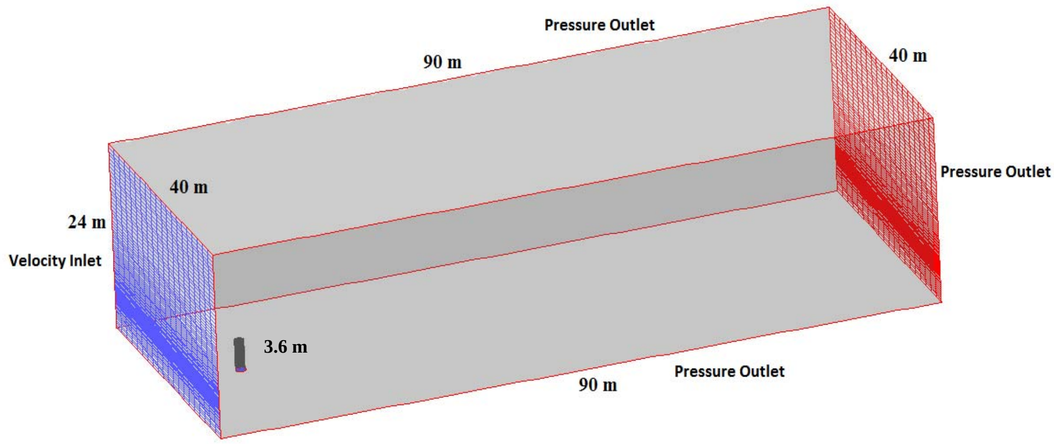
شکل ۶ مقایسهٔ نتایج آزمایشگاهی و عددی برای بازده فلر در سرعت‌های باد مختلف

شبیه‌سازی فلر پالایشگاه

پس از اعتبارسنجی نتایج و اطمینان از فرضیات به‌کار رفته در مدل‌سازی عددی، فلر پالایشگاه سرخون و قشم در ابعاد واقعی آن مورد بررسی قرار گرفته است. فلر این پالایشگاه دارای ارتفاع ۶۰ متر با ارتفاع نوک ۳/۶ متر، قطر خارجی ۱ متر و قطر داخلی ۰/۸۱۴ متر می‌باشد. نمایشی از ابعاد محیط حل درنظر گرفته‌شده در شکل (۷) ارائه گردیده است. در ابتدا، ابعاد محیط حل طوری درنظر گرفته شده است که در حداکثر سرعت باد، تمامی شعله درون محیط حل گنجانده شود، سپس ابعاد افزایش داده شده است تا آن‌جا که با بزرگ‌تر شدن محیط حل، شکل شعله دست‌خوش تغییر نگردد. طرح شبکه‌بندی برای این فلر نیز مشابه با مدل فلر در قسمت اعتبارسنجی می‌باشد، با این تفاوت که اندازه شبکه روی محیط فلر ۲۵ میلی‌متر و روی مرزهای خارجی ۲۵۰ میلی‌متر می‌باشد. انگیزهٔ اصلی از بررسی این فلر، ترک‌ها و گسیختگی‌هایی است که به‌طور مکرر در فلرهای پالایشگاه مشاهده شده است. به‌منظور بررسی علت گسیختگی جدار فلر، شکل شعله و توزیع دمای جدار فلر در سرعت‌های مختلف جریان باد مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

شرط مرزی درنظر گرفته‌شده برای ورودی گازهای فلر به محیط حل و ورودی جریان هوای محیط از نوع سرعت مشخص (Velocity Inlet) و شرط مرزی سایر سطوح محیط حل از نوع فشار مشخص (Pressure Outlet) با فشار اتمسفریک درنظر گرفته شده است. سرعت خروج گازها از فلر برابر با ۰/۵۰۳ متر بر ثانیه می‌باشد و شبیه‌سازی برای سرعت‌های مختلف باد انجام شده است. به‌منظور درنظر گرفتن اثرات خنک‌کنندگی جریان گاز درون فلر قبل از احتراق با هوا، جریان گاز درون فلر نیز جزئی از شبکهٔ محاسباتی درنظر گرفته شده است و معادلات حاکم بر جریان در این ناحیه نیز حل شده‌اند. ترکیب گازهای خروجی از فلر پالایشگاه در جدول (۳) و سرعت‌های باد بررسی‌شده در جدول (۴) ارائه شده‌اند.

کمترین سرعت ۲ متر بر ثانیه و بیشترین سرعت ۳۰ متر بر ثانیه است که مطابق با بیشترین مقدار سرعت باد گزارش‌شده در منطقهٔ احداث پالایشگاه می‌باشد. در شکل‌های (۱۲-۸) توزیع شکل شعله و توزیع دمای جدار فلر برحسب درجهٔ کلوین نشان داده شده است. به‌دلیل اثرات متقابل نیروهای شناوری و وزش باد بر شعله، با افزایش سرعت باد، محور شعله از راستای قائم منحرف می‌شود و برحسب سرعت باد به‌سمت افق متمایل می‌گردد.



شکل ۷ ابعاد محیط حل و شرایط مرزی درنظر گرفته‌شده برای شبیه‌سازی فلر پالایشگاه

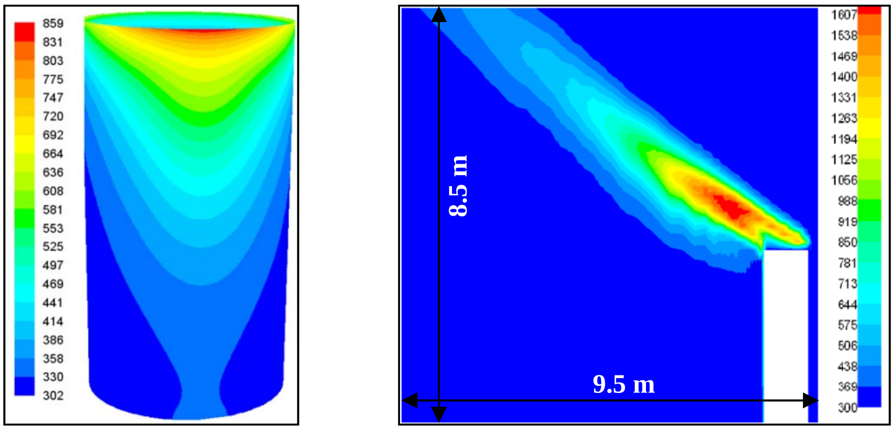
جدول ۳ ترکیب گونه‌های موجود در جریان سوخت عبوری از فلر پالایشگاه

گونه	درصد مولی
CH_4	۷۵/۳۹۹
C_2H_6	۹/۷۸۸
C_3H_6	۵/۶۵۱
C_4H_{10}	۳/۳۶۵۳
C_5H_{10}	۱/۵۵۴
C_6H_{14}	۰/۵۵۹
C_7H_{16}	۰/۰۰۱
N_2	۱/۶۴۷
CO_2	۱/۵۸۴
H_2O	۰/۱۶۴

جدول ۴ سرعت‌های باد بررسی‌شده برای فلر پالایشگاه.

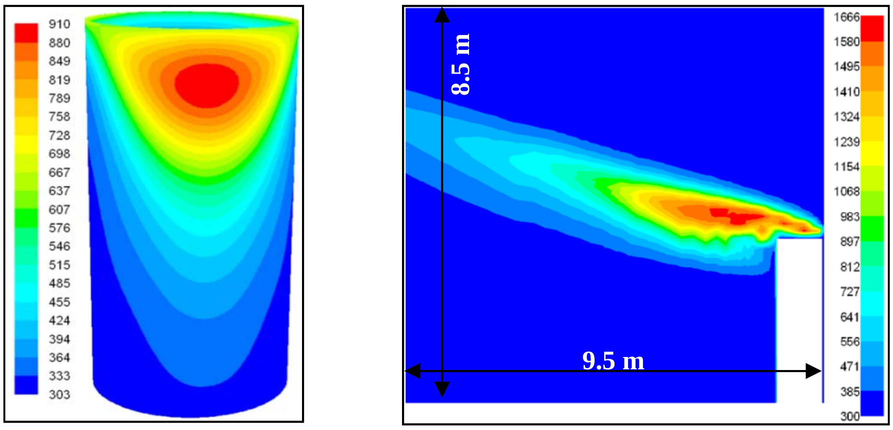
حالت	سرعت باد (m/s)
A	۲
B	۵
C	۱۰
D	۱۵
E	۳۰

در سرعت باد ۲ m/s شعله دارای شیب تقریباً ۴۵ درجه نسبت به محور فلر است و با افزایش سرعت جریان باد، این زاویه به‌تدریج افزایش می‌یابد و به ۹۰ درجه در سرعت باد ۳۰ m/s می‌رسد. با افزایش سرعت باد، مومنتوم مربوط به آن در اطراف دهانهٔ فلر مناسب با توان دوم سرعت آن افزایش می‌یابد و شعله را به حالت افقی درمی‌آورد. هم‌چنین با افزایش سرعت باد، دمای ماکزیمم و اندازهٔ شعله کاهش می‌یابد. نکتهٔ بسیار مهم، افزایش دمای دیوارهٔ فلر با افزایش سرعت باد علی‌رغم کاهش دمای شعله است. بدین معنی که در سرعت‌های بالاتر دمای شعله کاهش پیدا کرده است، اما دمای دیوارهٔ فلر افزایش یافته است. علت این رفتار نزدیک‌تر شدن شعله به جدار فلر و افزایش ضریب انتقال حرارت بین شعله و جدار فلر می‌باشد. هم‌چنین با بیشتر شدن سرعت جریان باد، شدت چرخش گردابه‌های به‌وجودآمده در طرف پشت به باد فلر قوی‌تر می‌شوند و گازهای محترق‌شده بیشتر به‌سمت دیواره متمایل می‌شوند که باعث افزایش دما روی بدنهٔ فلر خواهد شد.



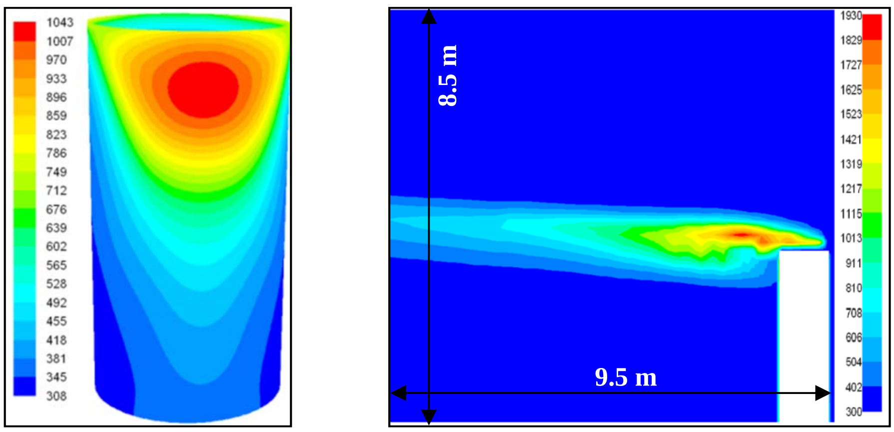
(ب) (الف)

شکل ۸ (الف) توزیع دما و (ب) دمای جدار فلر در سرعت باد ۲ m/s.



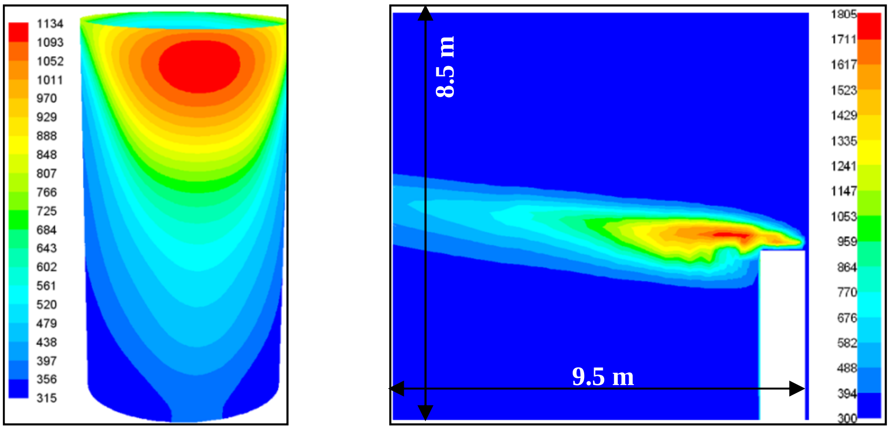
(ب) (الف)

شکل ۹ (الف) توزیع دما و (ب) دمای جدار فلر در سرعت باد ۵ m/s.



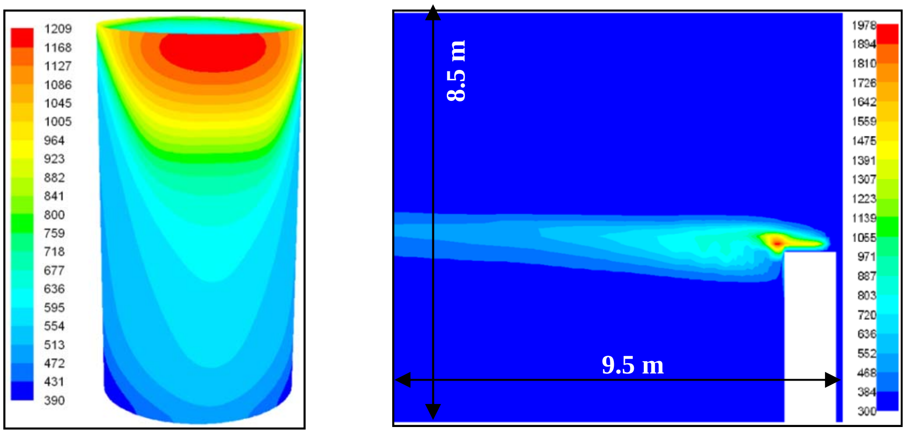
(ب) (الف)

شکل ۱۰ (الف) توزیع دما و (ب) دمای جدار فلر در سرعت باد ۱۰ m/s.



(الف)   (ب)

شکل ۱۱ (الف) توزیع دما و (ب) دمای جدار فلر در سرعت باد ۱۵ m/s.

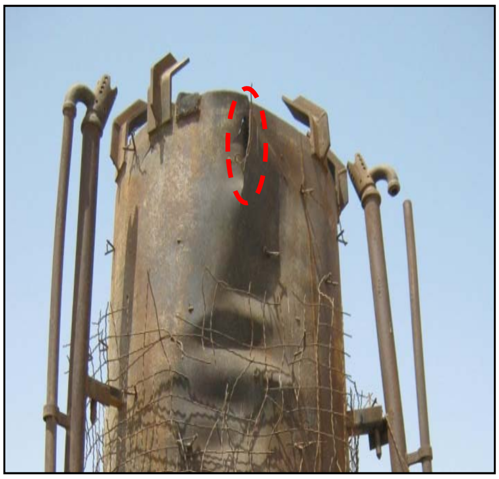


(الف)   (ب)

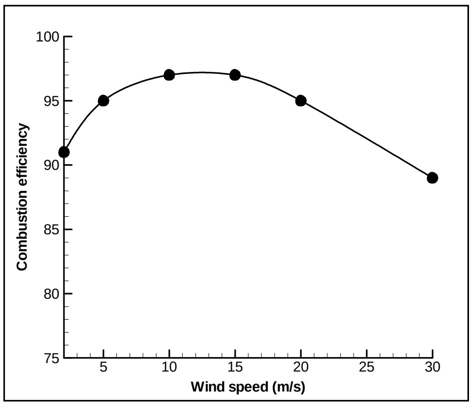
شکل ۱۲ (الف) توزیع دما و (ب) دمای جدار فلر در سرعت باد ۳۰ m/s.

در سرعت باد ۲ متر بر ثانیه، موقعیت دمای حداکثر بدنه بر لبهٔ دیوارهٔ فلر قرار دارد. به‌تدریج با افزایش سرعت باد بیشترین دمای بدنه از لبهٔ فلر جدا می‌شود و به‌سمت پایین حرکت می‌کند؛ به‌طوری‌که در سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه، منطقه بیشترین دمای بدنهٔ فلر پایین‌ترین موقعیت را نسبت به لبهٔ بالایی فلر دارد. در سرعت باد ۱۵ متر بر ثانیه، منطقهٔ بیشترین دمای شعله دوباره به‌سمت لبهٔ فلر حرکت می‌کند. بنابراین با تغییر سرعت باد، منطقهٔ بیشترین دمای شعله روی یک خط که از لبهٔ بالایی فلر تا ۴۰ سانتی‌متر به‌سمت پایین کشیده می‌شود، حرکت می‌کند. از آن‌جایی که در نقاط با گرادیان دمای حداکثر، تنش‌های حرارتی نیز دارای بیشترین مقدار هستند، لذا بیشترین تنش‌های حرارتی بر روی این خط به‌وجود می‌آیند. تغییر سرعت باد و تغییر تنش‌های حرارتی روی این خط، به مرور زمان می‌تواند باعث ایجاد خستگی و آسیب در جدار فلر شود. در شکل (۱۳) نتایج عکس‌برداری شده از محل ترک دیوارهٔ فلر نشان داده شده است. برای جلوگیری از ایجاد چنین ترک‌هایی می‌توان از فلرهای هواکمک و یا از مخروطی کردن نوک فلر برای افزایش سرعت جریان گاز خروجی از فلر و جلوگیری از خوابیدن شعله روی فلر استفاده کرد.

در شکل (۱۴) راندمان فلر نیروگاه برحسب سرعت جریان باد نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، راندمان تا سرعت ۱۵ متر بر ثانیه افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد که این روند مشابه با روند تغییرات در فلر مطالعه‌شده در آزمایشگاه می‌باشد. افزایش سرعت باد به بیش از ۲۰ متر بر ثانیه علاوه بر این‌که سبب کاهش راندمان فلر می‌شود، باعث نزدیک‌تر شدن نقطهٔ حداکثر دما به جدارهٔ فلر و افزایش دمای آن می‌شود.



شکل ۱۳ نمایش ناحیهٔ آسیب‌دیده (سمت پشت به باد) در اطراف دهانهٔ فلر



شکل ۱۴ نمودار راندمان فلر پالایشگاه برحسب سرعت جریان باد

نتیجه‌گیری

سرعت و جهت جریان باد نقش مهمی بر شکل شعله و توزیع دمای ناشی از آن در بدنهٔ مشعل‌های بلند پالایشگاه دارند. باتوجه به ارتفاع بلند این مشعل‌ها، انجام آزمایش در مقیاس واقعی بسیار دشوار و عملاً غیرممکن است. لذا در این مقاله اثر سرعت باد بر شکل شعله و توزیع دمای بدنهٔ آنها بااستفاده از شبیه‌سازی رایانه‌ای بررسی شده است. بدین منظور بااستفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی احتراق آشفته در نوک مشعل، موقعیت شعله و دمای بدنهٔ مشعل در سرعت‌های مختلف جریان باد محاسبه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش سرعت باد، محور شعله به‌سمت بدنهٔ فلر منحرف می‌شود و در سرعت‌های بالا شعله روی بدنهٔ مشعل می‌خوابد که سبب بالا رفتن دمای بدنه می‌گردد. جابه‌جا شدن موقعیت دمای بیشینهٔ بدنه با تغییر سرعت باد، باعث ایجاد تنش‌های حرارتی مختلفی در بدنهٔ فلر می‌شود که می‌تواند سبب ایجاد خستگی و گسیختگی طولی در بدنهٔ مشعل گردد. تصویری از این نوع آسیب مشاهده شده در پالایشگاه نیز ارائه گردیده است. دقت قابل قبول نتایج این پژوهش نشان می‌دهد می‌توان از این ابزار عددی به‌طور مؤثری برای طراحی فلرها استفاده کرد.

تشکر و قدردانی

این پروژه تحت حمایت پالایشگاه گاز سرخون و قشم با قرارداد پژوهشی شمارهٔ ۲۶۵۸۲۲ انجام شده است.

مراجع

1. Johnson, M.R., Zastavniuk, O., Wilson D.J. and Kostiuk, L.W., "*Efficiency Measurements of Flares in a Cross Flow*", Combustion and Environment Group, Department of Mechanical Engineering, University of Alberta, (1999).
2. Johnson, M.R., Majeski, A.J., Wilson, D.J. and Kostiuk, L.W. "The combustion efficiency of a propane jet diffusion flame in cross flow", Combustion and Environment Group, Department of Mechanical Engineering, University of Alberta, (1998).
3. Majeski, A.J., Wilson D.J. and Kostiuk, L.W., "Size and trajectory of a flare in a cross flow", Combustion and Environment Group, Department of Mechanical Engineering, University of Alberta, Canada, (1999).
4. Stone, D.K., Lynch, S.K. and Pandullo, R.F., *"Flares",* U.S. Environmental Protection Agency Research Triangle Park, NC 27711, (1995).
5. Castieira, D. and Edgar, T.F., "*Computational Fluid Dynamics for Simulation of Wind-Tunnel Experiments on Flare Combustion Systems"*, Department of Chemical Engineering, University of Texas at Austin, Texas 78712-0231, (2008).

۶. معصومی، ح. و آب‌روشن، ح.، *بررسی عددی اثر تغییر زاویه مشعل‌ها بر پدیده احتراق در دیگ بخار یک نیروگاه منتخب*، *نشریه علمی-پژوهشی سوخت و احتراق*، سال پنجم، شماره اول، بهار و تابستان (۱۳۹۱).

7. Baukal, C.E., Gershtein, V.Y. and Li, X., *"Computational Fluid Dynamics in Industrial Combustion",* CRC Press LLC: Boca Raton, FL, (2000).
8. Huang, R.F. and Chang, J.M., "The stability and visualized flame and flow structures of a combusting jet in cross flow", *Combustion and Flame*, No. 98, pp. 267-278, (1994).
9. Huang, R.F. and Wang, S.M., "Characteristic flow modes of wake-stabilized jet flames in a transverse air stream", *Combustion and Flame*, No. 117, pp. 59-77, (1999).
10. Bourguignon, E., Johnson, M.R. and Kostiuk, L.W., "The use of a closed-loop wind tunnel for measuring the combustion efficiency of flames in a cross flow", *Combustion and Flame*, No. 119, pp. 319-334, (1999).
11. Castieira, D. and Edgar, T.F., "CFD for Simulation of Steam-Assisted and Air-Assisted Flare", *Energy & Fuels*, No. 20, pp. 1044-1056, (2006).
12. Marra, F.S. and Continillo, G., "Dynamic Numerical Simulation of an Enclosed Flare", Italian Section of the Combustion Institiute, Universita Degli Studi Di Napoli Federico II, (2009).
13. Langman, A.S. and Nathan, G.J., "Influence of a combustion-driven oscillation on global mixing in the flame from a refinery flare", *Experimental Thermal and Fluid Science*, No. 35, pp. 199–210, (2011).
14. Launder, B.E., Reece, G.J. and Rodi, W., "Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence Closure", *J. Fluid Mech.*, No. 68(3), pp. 537–566, (1975).
15. FLUENT 6.3., User's Guide, Fluent Inc., (2006).
16. Jones, W.P. and Whitelaw, J.H., "Calculation Methods for Reacting Turbulent Flows: A Review", *Combustion and Flame*, No. 48, pp. 1–26, (1982).
17. Peters, N., "Turbulent Combustion", Cambridge University Press, (2004).
18. Johnson, M.R. and Kostiuk, L.W., "Efficiencies of low-momentum jet diffusion flames in crosswinds", *Combustion and Flame*, No. 123, pp. 189-200, (2000).